



Minderungsmöglichkeit der Stickoxid- Belastungen in einem Tunnel und am Tunnelportal mit Hilfe von photokatalytisch aktives Material enthaltenden Tunnelkassetten

Dr. Thomas Flassak

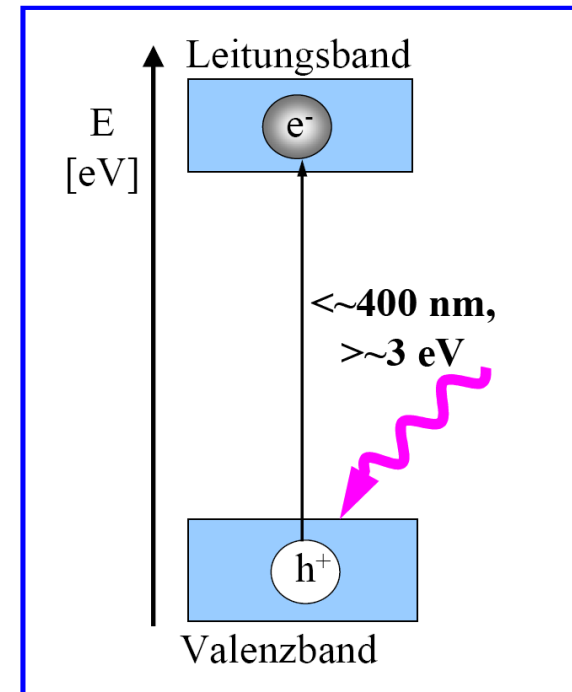
Ingenieurbüro Lohmeyer
GmbH & Co. KG

An der Rossweid 3

D-76229 Karlsruhe



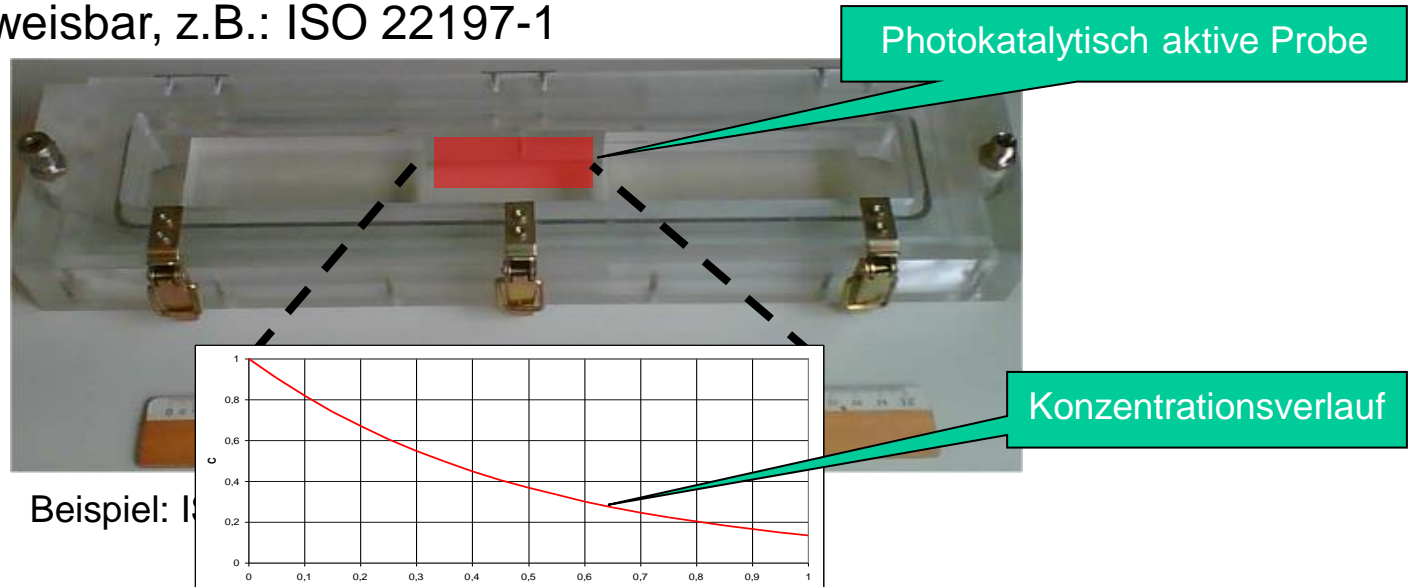
- Titandioxid (TiO_2) schon seit 1967 als effektiver Photokatalysator bekannt: „*Honda-Fujishima Effekt*“
- Mechanismus:
 - UV-Licht < 400 nm:
 - Freies Elektron e^- im Leitungsband
 - Elektronenlücke h^+ im Valenzband
 - Reduktion (e^-) bzw. Oxidation (h^+) adsorbierter Stoffe z.B. NO_x



Bildquelle: Kleffmann, Uni Wuppertal



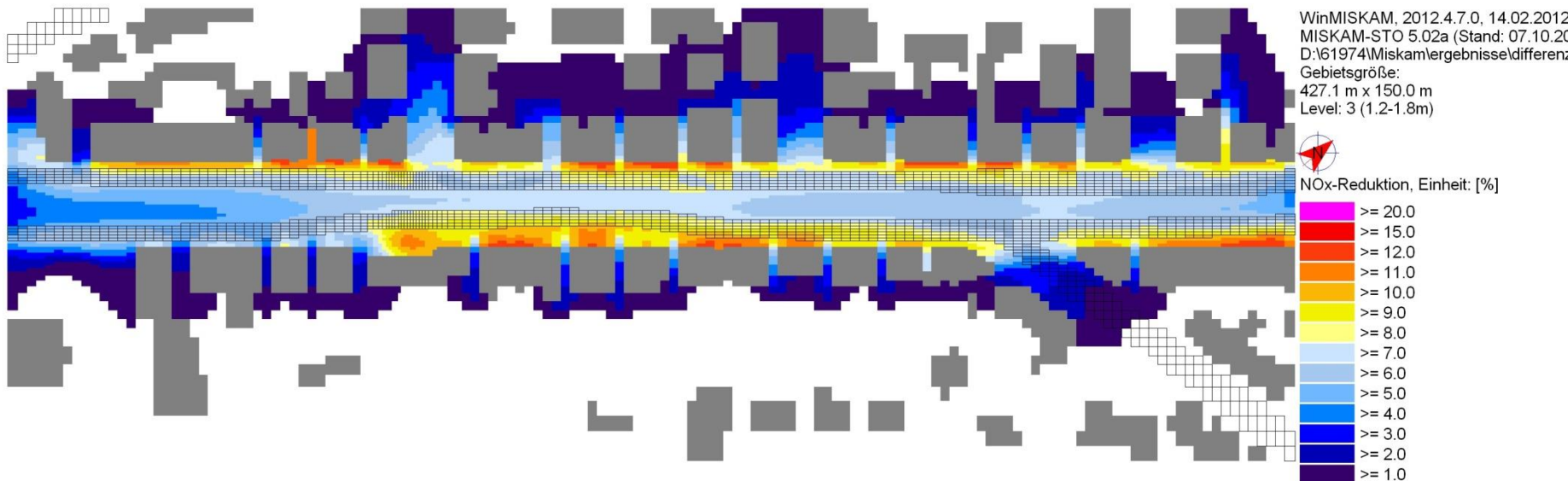
- Photokatalytischer Abbau von Stickoxiden durch Katalysator TiO_2 im Labor gut nachweisbar, z.B.: ISO 22197-1



- Übertragung der Laborergebnisse auf reale Anwendung mit Hilfe eines geeigneten dreidimensionalen numerischen Strömungs- und Ausbreitungsmodells.
- Koppelgröße von Labormessungen zum numerischen Modell: **photokatalytische Abbaugeschwindigkeit** (siehe z.B.: Engel et al. (2014): *Determination of the photocatalytic deposition velocity, Chemical Engineering Journal, Volume 261, 1, 2015, pp. 88–94*)



- Ausgeprägte Straßenschlucht



- Berechnete prozentuale Minderung der NO_x -Gesamtbelastung in % in ca. 1.5 m über Grund
 - für Tagsituationen
 - mit Windgeschwindigkeiten ≤ 1.0 m/s und einer
 - UVA-Strahlungsintensität von mehr als 15 W/m^2
- Die maximalen Reduktionen der NO_x -Gesamtbelastung beträgt in diesem Fall **15 %**



- Tunnel am Universitätsplatz in Magdeburg, Abschätzung des zu erwartenden NO_x -Minderungspotentials durch photokatalytisch wirksame Baustoffe (2005)
- Numerische Modellierung der photokatalytischen Wirksamkeit von speziellen **Dispersionsfarben** der Fa. Sto AG zur Reduktion von Stickoxiden (2007)
 - *Flassak, Th., Sörgel, C., Burgeth, G., Duttlinger, W., Maban M. und Kleffmann J. (2011): Numerische Modellierung des photokatalytischen Stickoxidabbaus durch TiO_2 -dotierte Gebäudefassaden, Kolloquium Luftqualität an Straßen 2011 der BAST, 30. und 31. März 2011, Bergisch Gladbach.*
- **Nachrechnung In-situ-Experiment** in Bergamo
 - *Bolte, G. und Flassak Th. (2012): Saubere Luft dank Photokatalyse. Immissionsschutz Ausgabe 2/2012, 54-58.*
- Stuttgart Hohenheimer Straße (**Straßenschlucht**)
 - *Flassak, Th., Riffel, S. und Reuter, U. (2013): Photokatalyse konkret – Modellierung und Messung im Modellprojekt „Hohenheimer Straße“ der Stadt Stuttgart. In: 57. Betontage, 5. - 7. Februar 2013, Neu-Ulm.*
- Dortmund: „Platz der Partnerstädte“ (**Offener Platz**)
 - *Uehlendahl, S., Kurtenbach, R. und Flassak, Th. (2013): Dortmunder Pilotprojekt "Park der Partnerstädte" / Leonie-Reygers-Terrasse mit photokatalytisch aktiver Betonoberfläche. Kolloquium Luftqualität an Straßen 2013 der Bast, 20. und 21. März 2013, Bergisch Gladbach.*
- Simulation der Reduktion der NO_x -Immissionen durch den Einsatz photokatalytisch wirksamer Baustoffe im westlichen Portalbereich des geplanten Kriegsstraßentunnels in Karlsruhe, 2015.
- **BMBF-Verbundprojekt**: Nachhaltiger HighTech-Asphalt: Schadstoff- und lärmindernd mit neuer Verarbeitung und –überwachung (**NaHiTAs**), Teilvorhaben: Modellierung der photokatalytischen Aktivität. Laufzeit: 7.2015-6.2018.



- Von der BASt gefördertes Projekt „**Hauptstudie zur Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen**“ (FE 09.0184/2011/ARB)
- Erarbeitung von technischen Lösungen zur **Stickoxidreduktion** an einem **Tunnelstandort**
- Ziel des Vorhabens ist die **Konzeptionierung** und der Bau abgeschlossener **photokatalytischer Reaktoren** (Tunnelkassetten) sowie deren **Validierung** im Tunnel „Rudower Höhe“ an der BAB A 113 in Berlin
- Projekt ist in der ersten Phase abgeschlossen



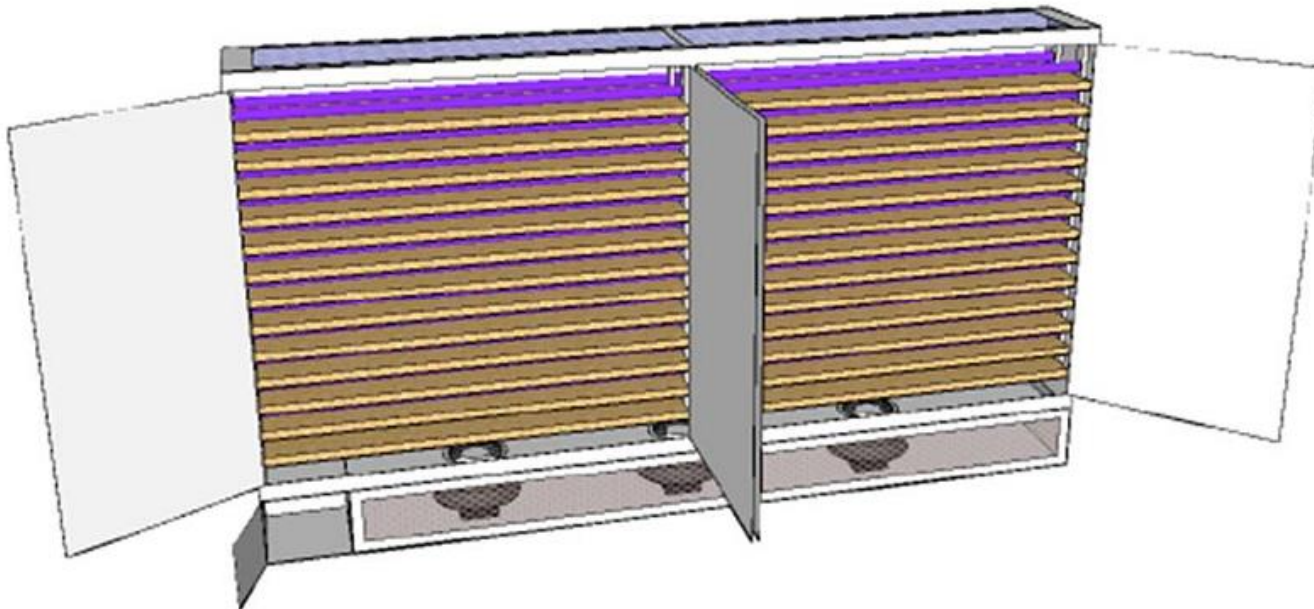
- **Auftragnehmer:** Prof. Dr.rer.nat. Dietmar Stephan. TU Berlin, Institut für Bauingenieurwesen - Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie. [Labor](#)
- **Unterauftragnehmer:**
Dr. Wolfgang Brunnhuber. WB Engineering EOOD/ZwNI., Piding. [Kassettenbau, Tunnelmessungen](#)
Dr. Thomas Flassak, Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe. [Numerische Simulation Tunnelkassetten mit Optimierung und Tunnel](#)
- **Berater:** PD Dr. Jörg Kleffmann, Bergische Universität Wuppertal, Physikalische & chemische Chemie.



- Tunnelwand und –decke photokatalytisch beschichten und mit UV-Lampen Tunnel beleuchten: “Observed NO_x reduction was **≤2%** and smaller than expected”: *Boonen et al. (2015): Construction of a photocatalytic de-polluting field site in the Leopold II tunnel in Brussels, Journal of Environmental Management 155 (2015) 136-144.*
- Idee: Tunnelluft in ein **geschlossenes System** absaugen und dort photokatalytisch abreinigen und der Tunnelluft wieder zuführen.
- Vorteil: Größere photokatalytisch aktive **Oberflächen** und höhere **UV-Strahlungsintensität** realisierbar.
- Voraussetzung für Phase 2: Stickoxidminderung der Tunnelabluft von **15%**.

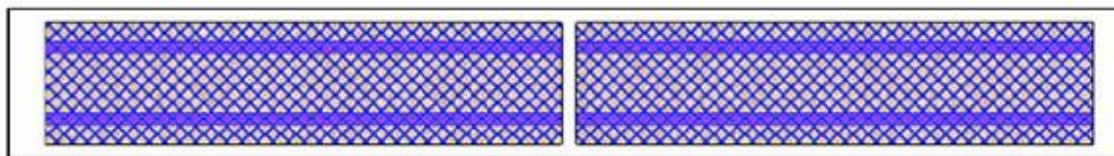
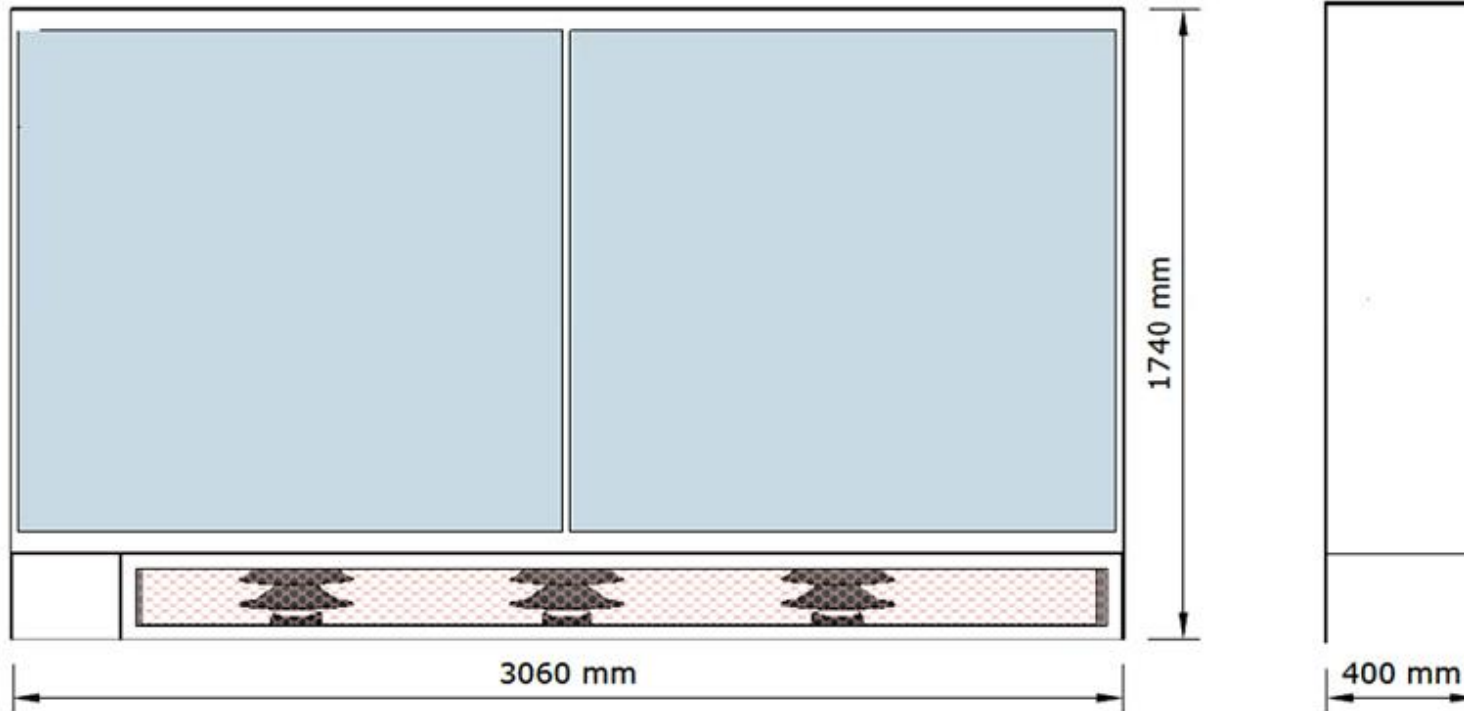


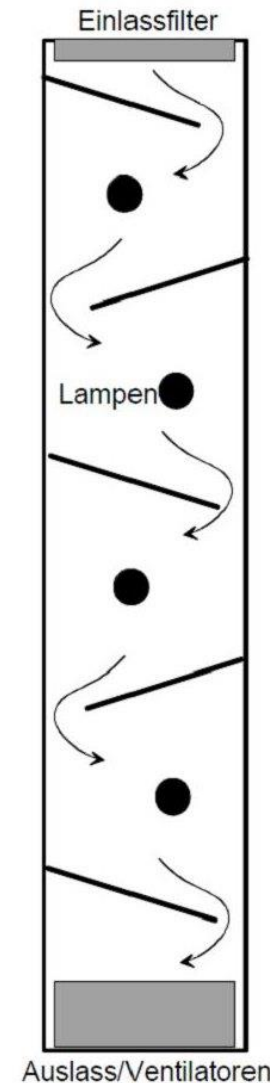
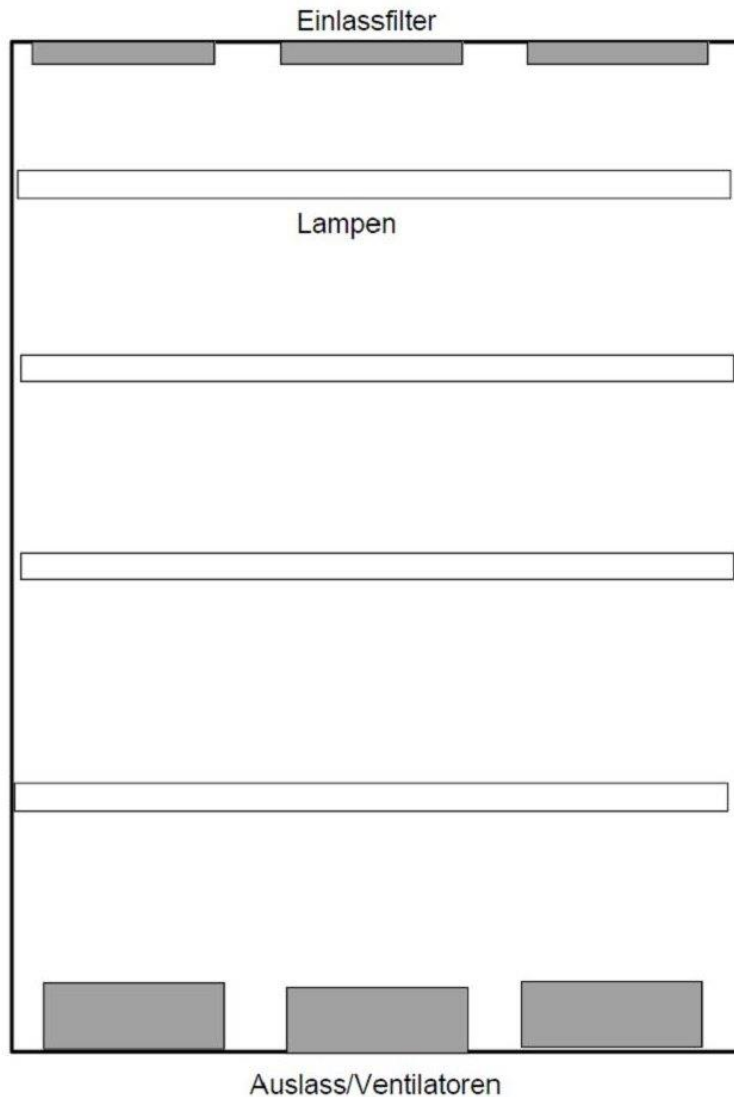
- Layout einer Tunnelkassette mit photokatalytischem Material (in braun) und integrierten UV-Lampen (in violett):
 - 2 x 13 photokatalytisch beschichtete **Schaummatten**, Photokatalytisch aktive Oberfläche/geometrischer Oberfläche LxB: 7
 - 2 x 2 x 13 UV-Lampen
 - $V = 1,8 \text{ m}^3$, Oberfläche $O = 119,4 \text{ m}^2$, $S/V = 66 \text{ m}^{-1}$
- 15% Stickoxidminderung: erreichbar mit **100 Tunnelkassetten**.
- Anzahl der Tunnelkassetten = f(Tunnelluftgeschwindigkeit)





- Gesamtgewicht einer Tunnelkassette: ca. 190-240 kg.





Innenwände + Bleche
(Ober- und Unterseite)
beschichtet mit
photokatalytischem
Material ($S_{ph}=6.12 \text{ m}^2$).

Größe: BxTxH:
 $1 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} =$
 0.36 m^3

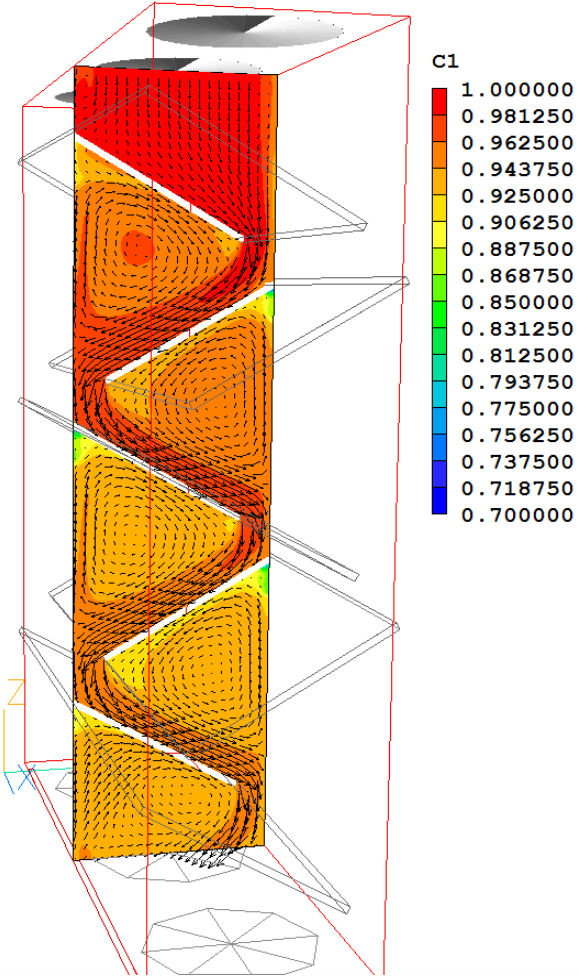
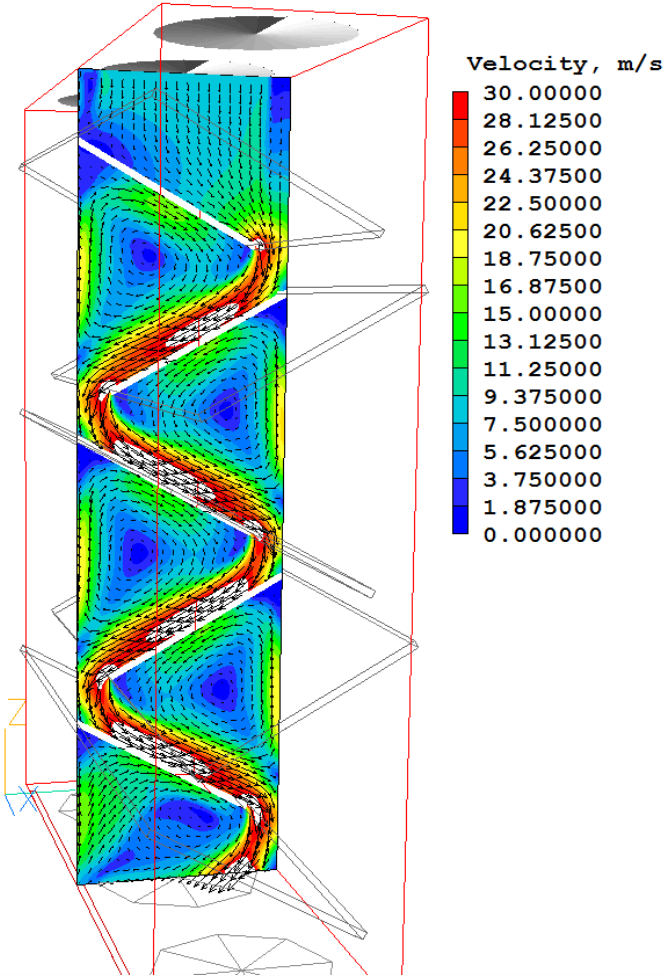
$S/V = 17 \text{ m}^{-1}$

3 Ventilatoren à
1600 m³/h

Bildquelle: Kleffmann

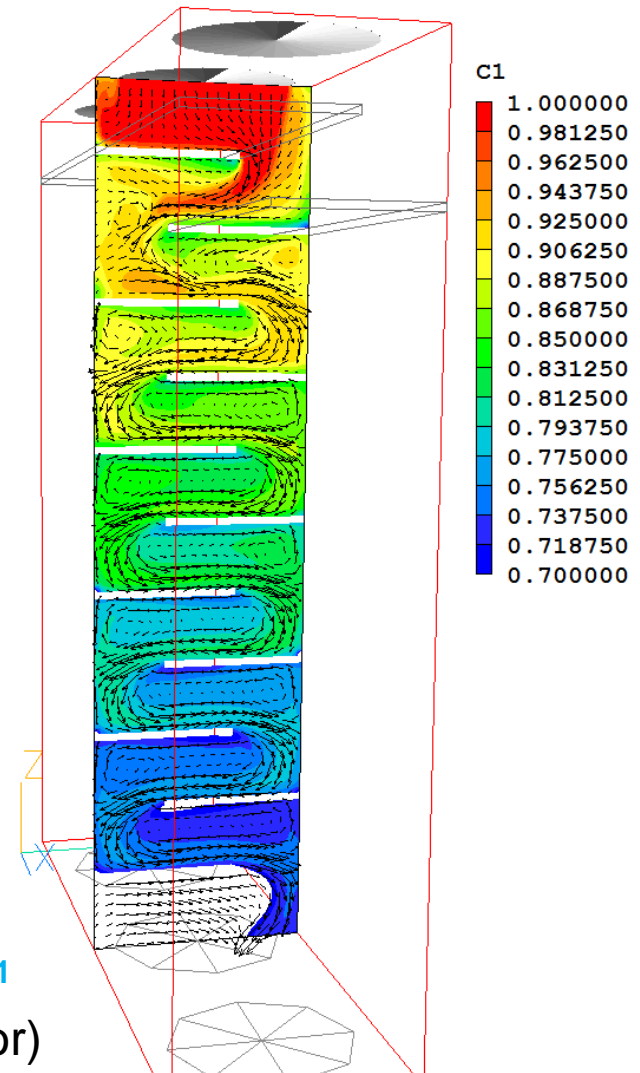
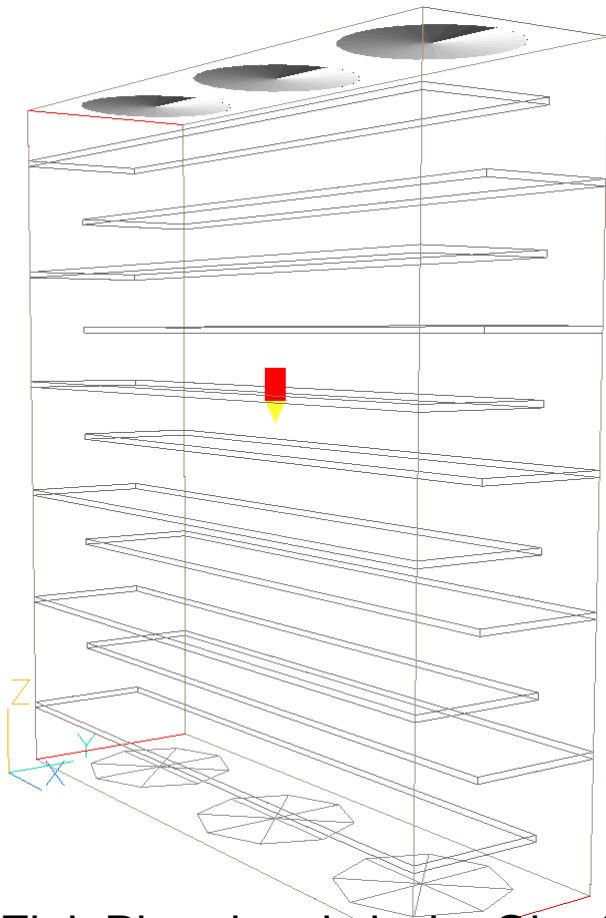


- CFD Software PHOENICS: Simulation der Geschwindigkeits- und Konzentrationsverteilung
- Problem: Spaltbreite 4 cm: Geschwindigkeit ca. 30 m/s ($p_{dvn}=535$ Pa)





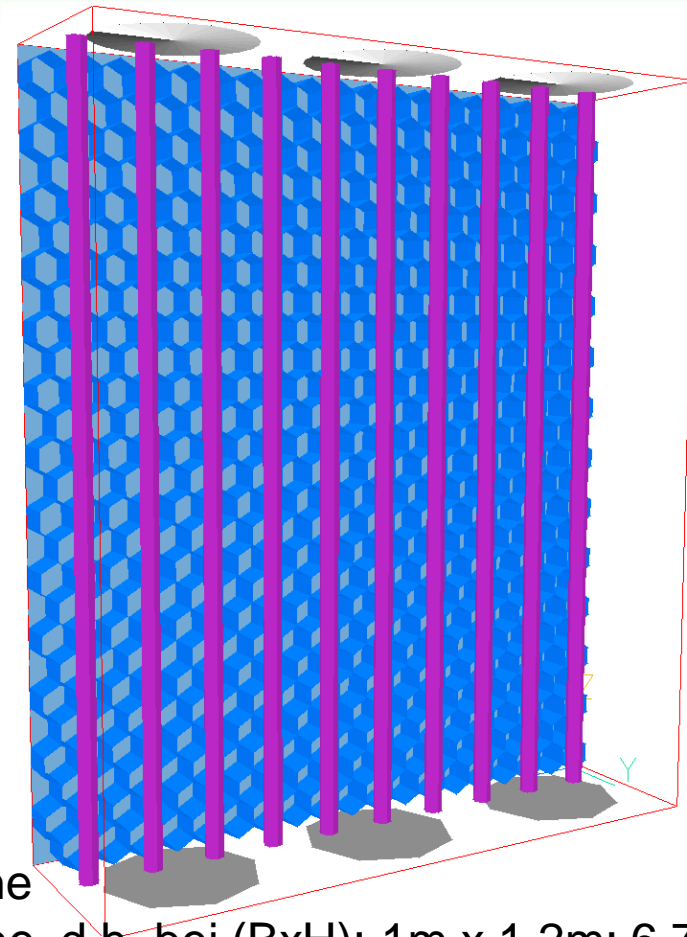
- Niedriger Volumenstrom:
 - Prozentualer photokatalytischer Stickoxidabbau hoch. (**Aber: Kriterium hier irrelevant**)
 - Stickoxidabbau bezogen auf maximal möglichen Stickoxidabbau gering. (Abbaupotential wird nicht ausgeschöpft)
 - Antriebsleistung bzw. Stromkosten gering.
- Hoher Volumenstrom:
 - Prozentualer photokatalytischer Stickoxidabbau niedrig.
 - **Stickoxidabbau bezogen auf maximal möglichen Stickoxidabbau hoch. (Abbaupotential wird ausgeschöpft)**
 - Antriebsleistung bzw. Stromkosten hoch.
- Achtung: Antriebsleistung bzw. Stromkosten \sim Volumenstrom³
- Festlegung im Projekt: Stickoxidabbau bezogen auf maximal möglichen Stickoxidabbau in der Tunnelkassette: **ca. 90%**



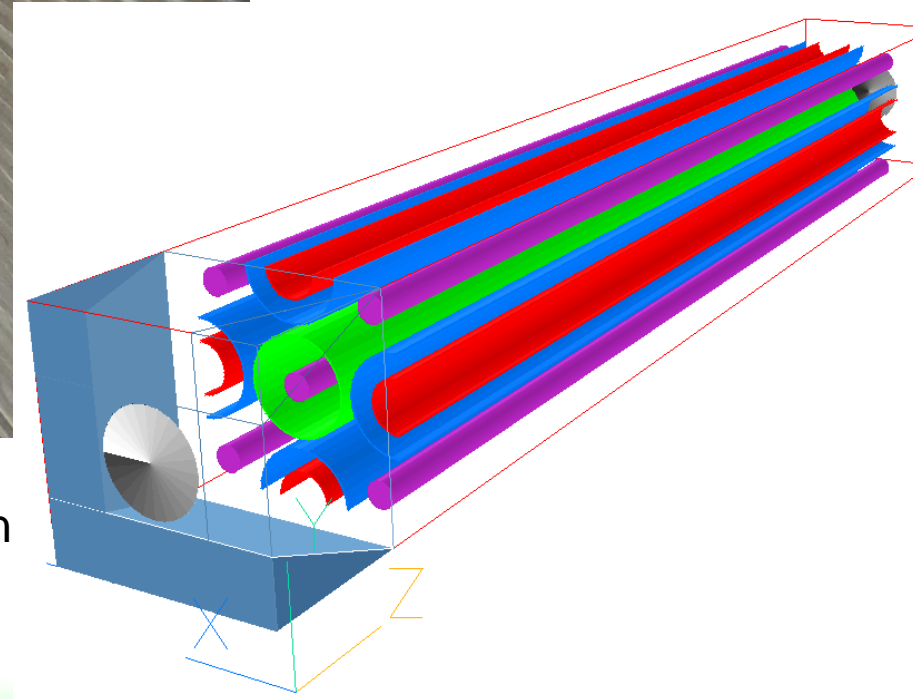
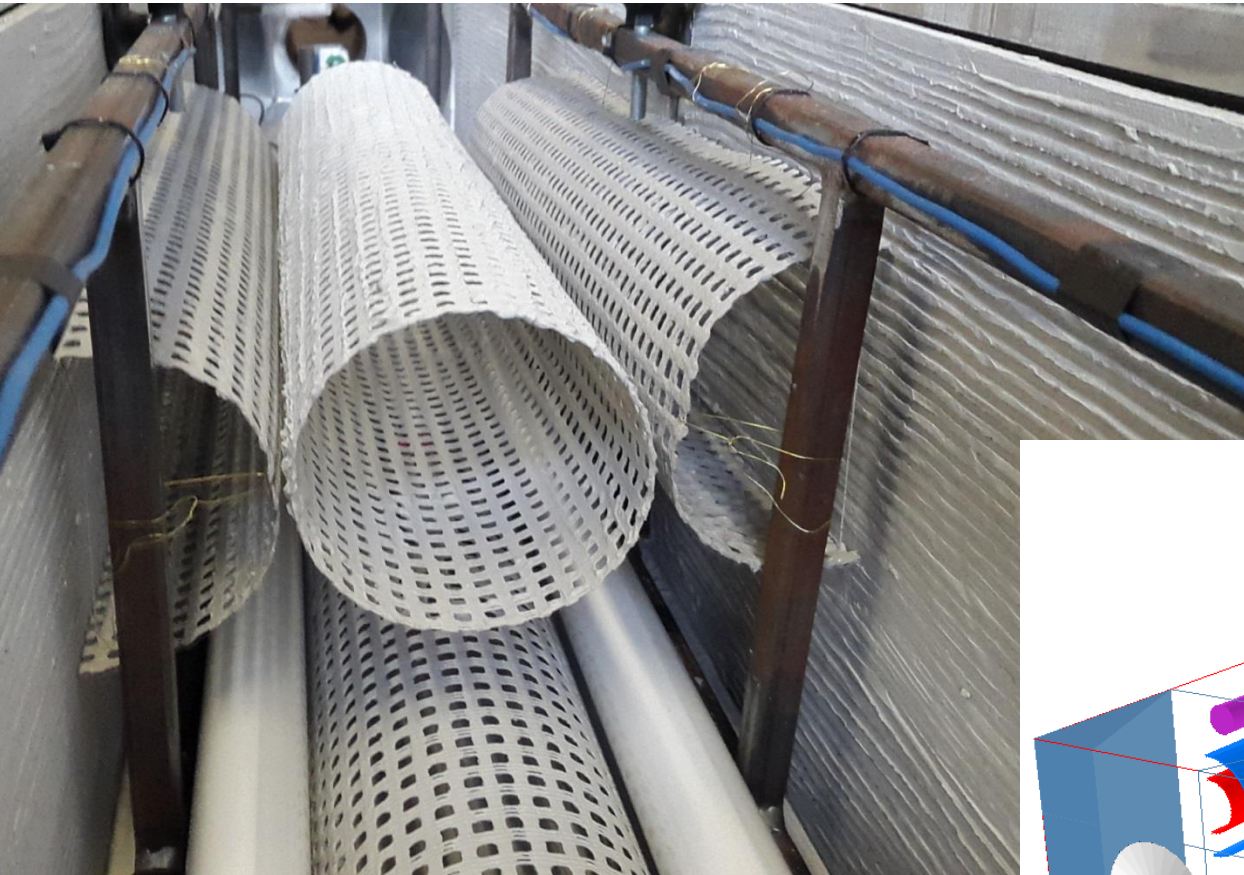
- Ziel: Photokatalytische Oberfläche vergrößern
- 11 Bleche, $1.0 \times 0.2 \text{ m}^2$, $S = 7.52 \text{ m}^2$, **$SV = 21 \text{ m}^{-1}$**
- Druckverlust: 512 Pa (bei $400 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Ventilator)



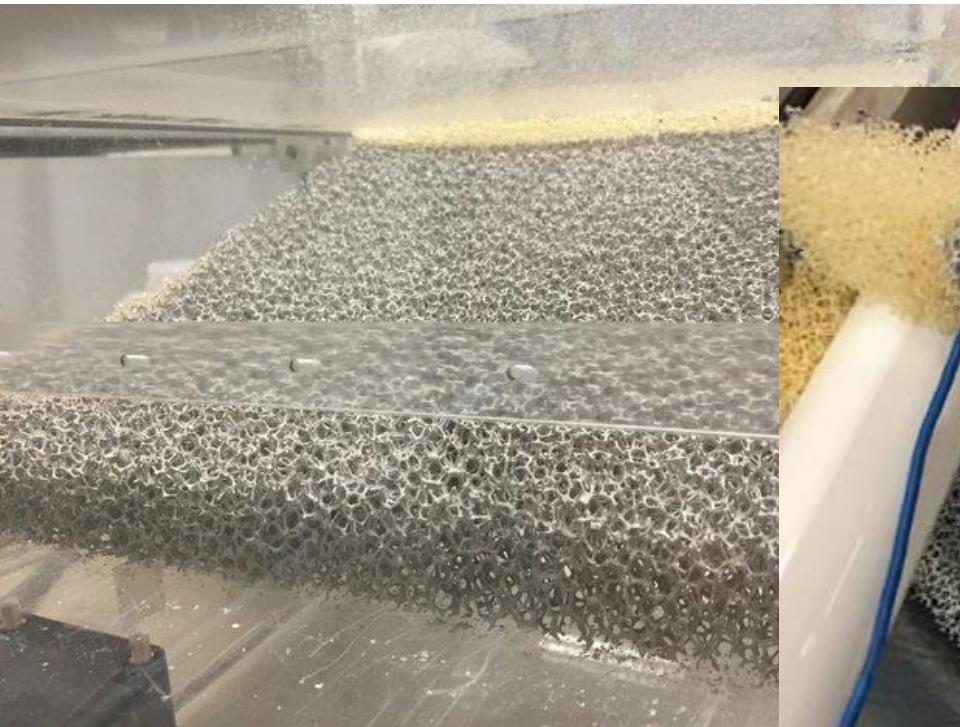
- Struktur von Bienenwaben
- Vorteil: Viel Oberfläche
- Idee: Paddock-Platten beschichten mit photokatalytischem Zement.



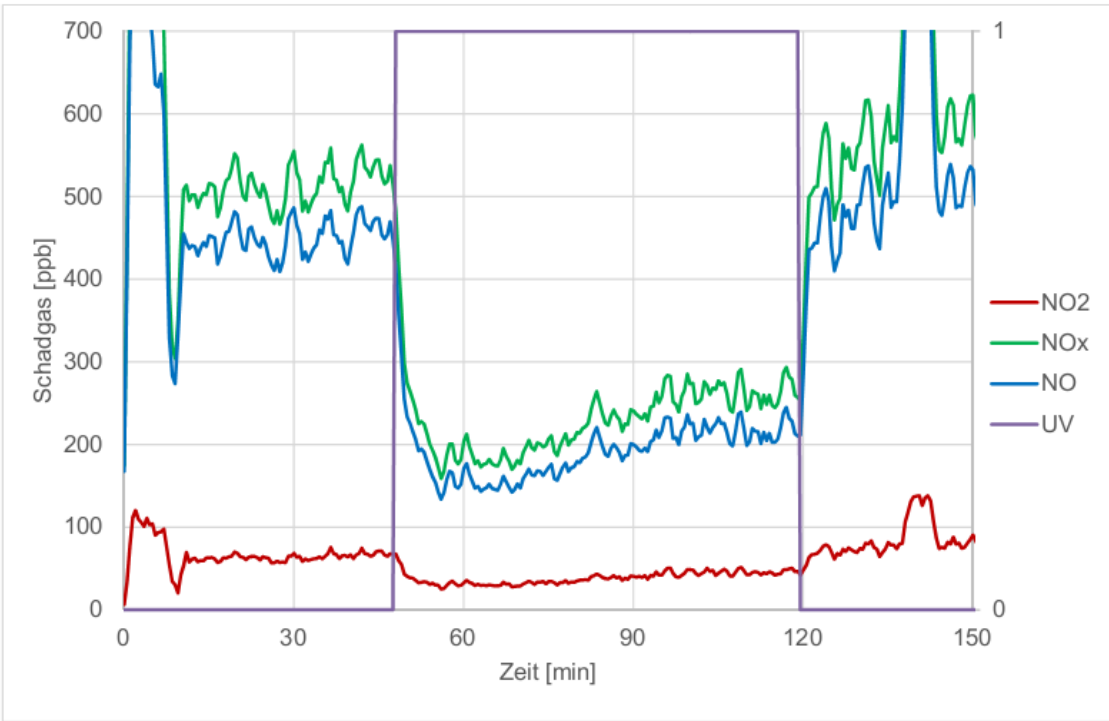
- Ziel: Viel Oberfläche
- $S = 5.6 \cdot \text{Grundfläche}$, d.h. bei (BxH): 1m x 1.2m: 6.72m².
- $S/V = 62 \text{ m}^{-1}$
- Abbaurrate (bei 3*400 m³/h): theoretisch 68% **numerisch: 20.0 %**:
- Problem: Wabentaschen werden nicht ausreichend mit schadstoffbeladener Luft versorgt. => **diffusionskontrolliert**



- Photoment-Mischung auf Armierungsmatten
- $S/V = 44 \text{ m}^{-1}$



- Photoment-Mischung auf Schaummaten (5 ppi)
- Hohes Verhältnis von Oberfläche zu geometrischer Oberfläche $L \times B$
- Diffusionsstrecke bis zur Katalysatoroberfläche: wenige Millimeter



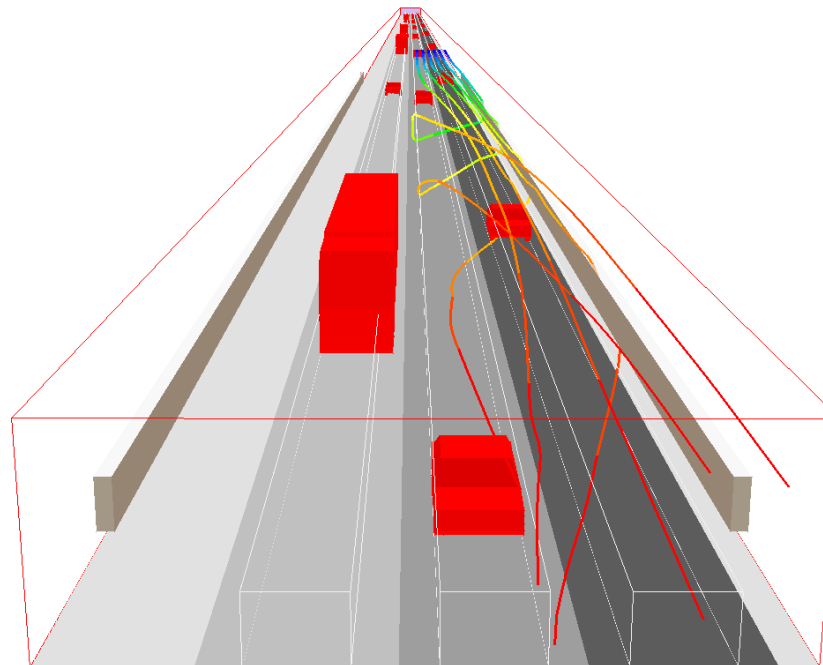
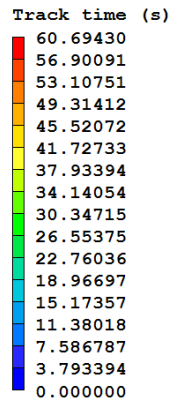
Teststandmessung mit sechs Schaumplatten
5 ppi Photocem, Volumenstrom 120 m³/h

Gegenüberstellung gemessener und modellierter Schadstoffabbau durch Photoment-Schaumplatten im Teststand

- Für 2 Matten liegt die Abbaurrate geringfügig höher als im Modell vorhergesagt. Vermutlich wurde im CSTR-Reaktor eine zu geringe Depositionsgeschwindigkeit des Materials bestimmt.
- Mit zunehmender Mattenzahl sinkt die Bestrahlungsstärke pro Katalysatoroberfläche durch die ungünstige Strahleranordnung. Somit fällt die gemessene zunehmend unter die erwartete Abbauleistung.
- Im Design der Tunnelkassette: Lampen werden parallel zur Schaumoberfläche angeordnet.

	NO-Abbau [%]	
	Modellberechnung:	Messung am Teststand:
2 Matten	30	32
4 Matten	52	49
6 Matten	66	58

- Weitere Arbeit: Simulation der Tunnelströmung. Frage: Erreicht die Tunnelluft die Tunnelkassetten?



- **Phase 2:** 10 Tunnelkassetten werden gebaut und getestet.



Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!

Fragen?